



マイクロ波帯交流磁場下におけるナノ構造体の磁化反転に関する研究

著者	古田 正樹
号	59
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	工博第5085号
URL	http://hdl.handle.net/10097/62720

氏 名	ふるた まさき
授 与 学 位	古田 正樹
学位授与年月日	博士 (工学)
学位授与の根拠法規	平成27年3月25日
研究科, 専攻の名称	学位規則第4条第1項
学 位 論 文 題 目	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 応用物理学専攻
	マイクロ波帯交流磁場下におけるナノ構造体の
	磁化反転に関する研究
指 導 教 員	東北大学教授 北上 修
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 佐久間 昭正 東北大学教授 安藤 康夫
	東北大学准教授 岡本 聡

論 文 内 容 要 旨

近年の目覚ましい情報化社会の発達を支える重要デバイスの一つに、情報ストレージデバイスが挙げられる。特に、ハードディスクドライブに代表される磁性体を利用した磁気記録デバイスは、低ビットコスト、高密度、不揮発、優れた書き換え耐性、高速データ転送などのメリットから、今日の大容量情報ストレージデバイスの主役である。磁気記録デバイスは、スピントロニクス技術などとの融合により急速にその記録密度を増し、いまやビットサイズはナノメートル領域に入りつつある。しかし、その一方で、ビットの微細化に伴う磁化の熱揺らぎは深刻となり、高密度化は理論的限界を迎えつつある。この状況を打破する有力候補として、近年マイクロ波アシスト磁化反転 (Microwave Assisted magnetization Switching: MAS) 技術が提案された。MAS は、マイクロ波帯の交流磁場を補助エネルギーとして与えることで、磁化の歳差運動を誘起し、結果として反転磁場を低減できる (マイクロ波アシスト効果)。このため、高い磁気異方性の材料を記録媒体に適用でき、磁化の熱揺らぎ問題を克服できる。

これまで MAS に関する研究は、磁化の動的挙動を記述する Landaun-Lifshitz-Gilbert (LLG) 方程式の解析計算や計算機シミュレーションに基づいた理論構築と、実証実験により進められてきた。理論については、主にマクロスピンに基づく理解が進んでおり、反転メカニズムやマイクロ波アシスト効果の制御パラメータなどが明らかにされている。しかしながら、有限サイズの磁性体における反転メカニズムやマイクロ波アシスト効果についてはほとんど未解明なのが現状である。実証実験では種々の垂直磁化材料が対象とされているが、ほとんどがマイクロ波アシスト効果を確認したに過ぎず、反転メカニズムについての議論はほとんどなされていない。このような状況において、つい最近、反転メカニズムの解明を目的として、垂直磁化材料である Co/Pt 多層膜 (以下、Co/Pt) ナノドットを用いた MAS 実験が報告された。その結果、Co/Pt ドットではマクロスピンモデルによる理論予測よりも非常に大きなマイクロ波アシスト効果を示した。詳細な LLG シミュレーションの結果、ドット内部で空間

的に非一様な歳差運動が生じており、これが著しく大きなアシスト効果に関与したことが議論されている。このように歳差運動の励起モードとマイクロ波アシスト効果の両者には強い相関があることが初めて示され、有限サイズの磁性体における MAS の物理現象がようやく解明され始めた。しかしながら、上述の通り MAS については限られた条件での研究に留まっており、その背景に横たわる物理への理解は十分とはいえないのが現状である。MAS を実用技術とするためにも、その背景となる物理を解明し現象理解を深めることは極めて重要な課題である。このため、種々の歳差運動の励起モードとマイクロ波アシスト効果を調査することで、MAS の理解が深化すると考えられる。

本論文ではナノ磁性体に対して様々な条件における歳差運動の励起モードとマイクロ波アシスト効果の相関について系統的な評価を行い、その背景にある物理や現象の理解を深め、さらにそれらの知見に基づいてマイクロ波アシスト効果の制御手法について検討することを目的とする。

本論文は全 6 章で構成されており、第 1 章では本研究の背景と目的について述べる。第 2 章では本研究で行なった実験とシミュレーションの方法について、その原理と手法について説明する。第 3 章では、面内方向の歳差運動の励起モードとマイクロ波アシスト効果の関係について説明する。第 4 章では、マイクロ波アシスト効果の分散について、その評価方法を確立し、物理的起源について検討した。第 5 章では、膜厚方向の歳差運動の励起モードとマイクロ波アシスト効果について説明する。第 6 章では、本論文の総括と今後の課題を記した。

第 3 章では、面内方向の歳差運動の励起モードとマイクロ波アシスト効果との相関を系統的に調査することを目的として、直径の異なる Co/Pt ドットアレイに対するマイクロ波アシスト効果の系統的实验と LLG シミュレーションを行った。その結果、マイクロ波アシスト効果には明瞭なドット直径依存性が確かめられた。ドット直径が 50 nm と微小な場合、反転磁場は交流磁場周波数 f_H に対して直線的に減少し、その傾きはマクロスピンモデルで予測される傾き $2\pi/\gamma$ と一致した。ここで、 γ はジャイロ磁気定数である。マクロスピンモデルにおいては、歳差運動の誘起は磁気モーメントに対し仮想的な逆磁場 $H_0 = 2\pi f_H / \gamma$ が作用していることと等価であり、有効場として直流磁場に加え H_0 が作用する。一方で、ドット直径 100 nm 以上では、交流磁場周波数の低い領域では 50 nm 径の場合と同様に傾き $2\pi/\gamma$ に従う反転磁場の周波数依存性を示すものの、交流磁場周波数の増大に伴い傾きが $2\pi/\gamma$ より小さくなる挙動を示し、結果としてマクロスピンモデルの予測を大きく上回るアシスト効果を示した。LLG シミュレーションによりドット内の歳差運動の励起モードを調べたところ、傾きが $2\pi/\gamma$ に一致する周波数領域ではマクロスピンモデルで想定している一様な歳差運動が励起されているのに対し、傾きが小さくなる周波数領域ではドット面内において同心円状の歳差運動が励起されていた。また、同心円状の歳差運動のspin波分散関係と LLG シミュレーションの結果を比較したところ、よく一致した結果を示した。このことから、面内方向の歳差運動の励起モードとマイクロ波アシスト効果に強い相関があり、特に同心円状の不均一な歳差運動によってマイクロ波アシスト効果が著しく増大することが分かった。

第4章ではマイクロ波アシスト効果の分散について、実験的に評価する方法を確立するとともに、分散の起源について考察した。マイクロ波アシスト効果の分散においては、反転磁場の分散に加えて、臨界周波数の分散を考えなければならない。そこで、Co/Pt ドットアレイの MAS 実験結果から、反転磁場および臨界周波数分散を定量評価した。反転磁場分散は交流磁場周波数の増加に従い減少した。これは、実験に用いた Co/Pt ドットサイズが交換結合長よりも大きく、ドット内の局所的な磁気特性を反映した反転核生成型の反転プロセスから、大振幅歳差運動の励起にともなう局所的な磁気特性の影響を受けない反転プロセスに変化したためと考えられる。また、反転磁場および臨界周波数分散共にドット直径依存性を示し、ドット直径の減少と共に分散は増大した。これも同様に大振幅歳差運動が励起された場合の反転プロセスで説明できる。大振幅歳差運動が励起された場合、ドットの有効異方性磁場が磁化反転を決めるようになり、このばらつきがマイクロ波アシスト効果の分散を支配するものと予想される。ドット直径が小さいとわずかな直径のばらつきでも大きな有効異方性磁場のばらつきに直結する。実験に用いたドットの有効異方性磁場のばらつきを見積もったところ、マイクロ波アシスト効果の分散をおおよそ説明できた。したがって、今回の実験においてドット径の減少に伴うマイクロ波アシスト効果の分散の増大が観測されたが、これは用いたドット試料の形状分散に依存しており MAS の本質的な現象ではないといえる。磁化反転の分散の問題は応用において記録信頼性に直結する問題であるため、実験的に定量評価する手法を確立するとともに、その起源を明らかにしたことは重要な成果と言える。

第5章では、膜厚方向の歳差運動の励起モードについて検討し、その励起モードとマイクロ波アシスト効果の相関を調査した。まず、2つのマクロスピンを結合させた結合2スピンモデルと、積層ドットを用いた有限要素モデルの LLG シミュレーションを行い、各層の異方性磁場、層間の交換相互作用や双極子相互作用に対するマイクロ波アシスト効果を調べた。その結果、50 nm 径の積層ドットのシミュレーションから、双極子相互作用のみが働き、層間の異方性磁場差が 5 kOe の場合、反転磁場は交流磁場周波数に対して傾き $2\pi/\gamma$ に一致したが、臨界周波数付近では傾きが $2\pi/\gamma$ より小さくなる挙動を示した。歳差運動の励起モードを詳細に調べたところ、傾きが $2\pi/\gamma$ に一致する場合、膜厚方向では一様に近い歳差運動の励起が確認された。一方、傾きが $2\pi/\gamma$ より小さくなる場合、上下層の歳差運動が逆位相になっており、膜厚方向で不均一な歳差運動が見られた。つまり、膜厚方向の不均一な歳差運動の励起によるマイクロ波アシスト効果を確認した。200 nm 径の積層ドットでも同様のシミュレーションを行ったところ、低周波領域から傾きが $2\pi/\gamma$ より小さくなる挙動が得られ、この径においても膜厚方向の不均一な歳差に起因したマイクロ波アシスト効果を確認した。次に、この積層ドットのマイクロ波アシスト効果を検証するために、異なる磁気特性を持つ Co/Pt 多層膜を2層積層した 200 - 500 nm 径の積層 Co/Pt ドットを作製し、実験を行った。ドット径によって程度の違いはあるものの、概ね反転磁場は周波数に対して直線的な変化を示さず、低周波領域から交流磁場周波数に対する反転磁場の傾きが $2\pi/\gamma$ から大きくずれる挙動を示した。大まかな挙動は同径の LLG シミュレーションと一致しており、積層ドットに起因した歳差運動の励起モードがマイクロ波アシスト効果に著しく影響することを実証する結果であると考え

ている.

以上のように, 本論文では歳差運動の励起モードとマイクロ波アシスト効果の相関を明らかにするため, Co/Pt ドットを用いた実験と LLG シミュレーションを行った. その結果, さまざまな励起モードがマイクロ波アシスト効果に強く影響することが分かった. この結果は, 単に MAS の物理的な背景を明確化しただけでなく, ハードディスクドライブに用いられる数 nm 径の磁性体のマイクロ波アシスト効果制御に応用できると考えられ, 応用物理学および電子情報デバイス工学の発展に少なからず寄与すると思われる.

論文審査結果の要旨

情報化社会を支える磁気記録技術は、スピントロニクス技術などとの融合により急速にその面記録密度を増し、いまやビットサイズはナノメートル領域に入りつつある。しかし、その一方で、ビットの微細化に伴う磁化の熱揺らぎは深刻となり、高密度化は原理的限界を迎えつつある。この状況を打破する有力候補として、近年マイクロ波アシスト記録が提案された。この方法によれば、マイクロ波帯交流磁場により磁化の歳差運動を誘起し、結果として反転磁場を低減できるために、高い磁気異方性の材料を記録媒体に適用し磁化の熱揺らぎを低減できる。これまでに、限られた条件での実験や計算機シミュレーションが幾つか報告されてきたが、交流磁場によりどのような磁化運動が誘起され、それがどのように磁化反転に結びつくかについては殆ど明らかにされていない。そこで本研究では、高精度に加工された垂直磁化Co/Ptドットを対象として、磁化反転に及ぼすマイクロ波帯交流磁場のアシスト効果（以降、Microwave-Assisted Switching : MAS効果と略す）を実験と計算により調べ、ドット内の磁化運動と反転の関係を解明することを目的としている。

本論文は以上の研究の成果をまとめたものであり全文6章で構成される。

第1章では研究の背景を、第2章では垂直磁化Co/Ptドット試料の作製法と評価方法、計算機シミュレーションについて述べている。第3章には、異なる直径のドットに対するMAS効果の系統的实验が報告されている。ドットが100 nm程度以下と微小な場合には、MAS効果はマクロスピンモデルに基づく解析およびシミュレーションの予測と定量的に一致し、磁化は一斉回転に近いモードで反転する。ドット径が増すと、MAS効果はさらに高周波領域に拡がり著しく反転磁場が減少する。これら一連のドット径に依存するMAS効果の挙動をスピン波理論により定量的に解釈することに成功している。つまりドット内には同心円状スピン波が励起され、径が小さい場合には低次モード ($m=1$) のみが励起されるが、径の増加と共にモード間ギャップが狭まり、その結果、高次モード ($m>1$) が励起されMAS効果は高周波領域にまで拡がる。さらに第4章では、反転磁場分散およびMAS効果が有効な臨界周波数の分散が、MAS効果により著しく低減されることを見出している。その原因に関しては、交流磁場により大振幅の歳差運動がドット内全体で励起されるため、磁化反転は各ドットにランダムに分布する局所欠陥の影響を受けにくく、異方性磁場に支配されるためと結論している。磁化反転の分散の問題は応用面において非常に重要であり、MAS効果により分散の著しい低減を実現できる見通しを得たことは特筆に値する。第5章では、前章までのドット面内ではなく、垂直方向に励起されるスピン波がMAS効果に及ぼす影響を検討している。異なる2つの磁性層の積層構造において、交換・双極子相互作用を介して生み出される磁化挙動を系統的にシミュレートし、さらに双極子相互作用で繋がる2層積層ドットのMAS効果の実験より、ドット垂直方向における不均一スピン波の存在を実証している。

以上のように、本論文は、高精度に加工された垂直磁化Co/Ptドットを用い、マイクロ波帯交流磁場の存在下における磁化挙動を系統的に調べ、反転磁場やその分散の顕著な低減を確認すると共に、その背景にある物理を初めて明確にした。これら一連の成果は、応用物理学および電子情報デバイス工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文を博士(工学) の学位論文として合格と認める。